
# Funções Hash

**Prof. Dr. Iaçanã Ianiski Weber**

*Confiabilidade e Segurança de Software*

98G08-4

*Agradecimentos especiais ao Prof. Avelino Zorzo e aos Autores Christof Paar e Jan Pelzl pelo material.*

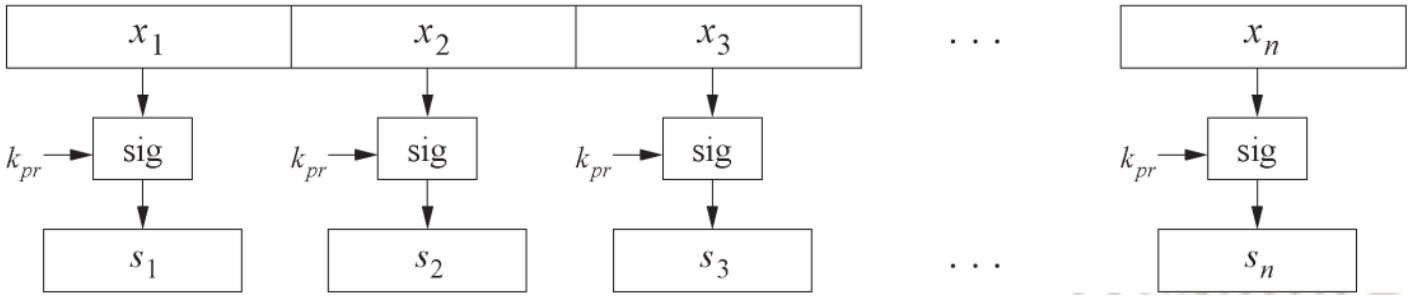
# Índice

# Índice

# Por que usar Funções de Hash para Assinaturas?

**O Problema: Assinatura ingênua de mensagens longas**

Assinar uma mensagem longa em blocos separados gera uma assinatura de tamanho similar ao da própria mensagem, o que é ineficiente.




**Isto gera três problemas principais:**

- **Sobrecarga Computacional:** Operações de chave pública são lentas e custosas para cada bloco.
- **Sobrecarga de Mensagem:** A assinatura final fica muito grande.
- **Limitações de Segurança:** Um atacante pode reordenar, remover ou duplicar blocos para forjar novas mensagens.

## Solução

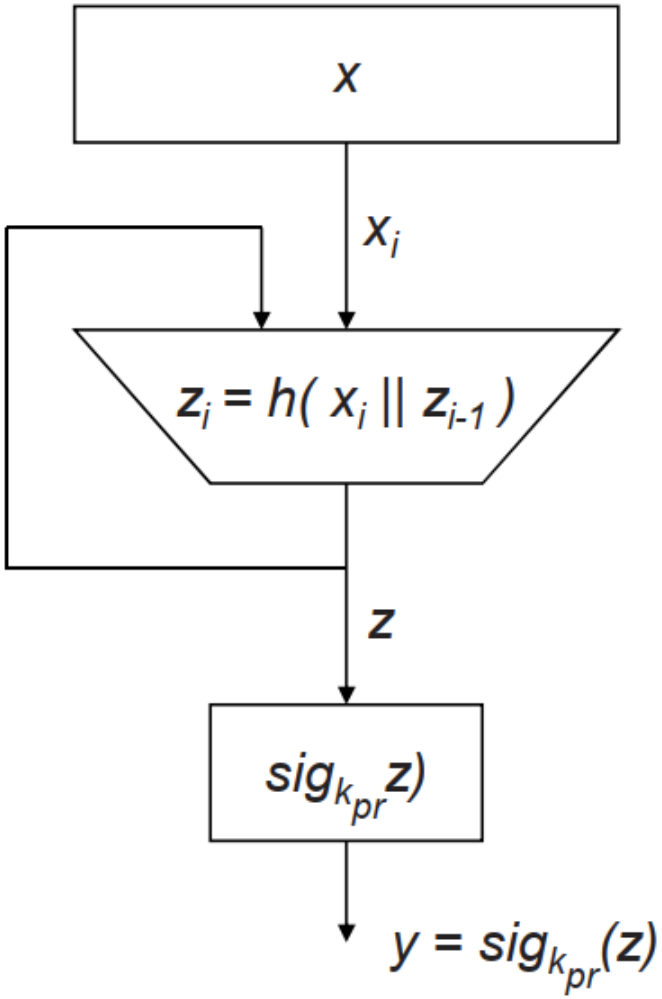
Em vez de assinar a mensagem inteira, assina-se apenas seu **digest** (ou **hash**).

→ Igualmente seguro, muito mais rápido.

## Necessidade

Isso requer o uso de **Funções de Hash** criptográficas.

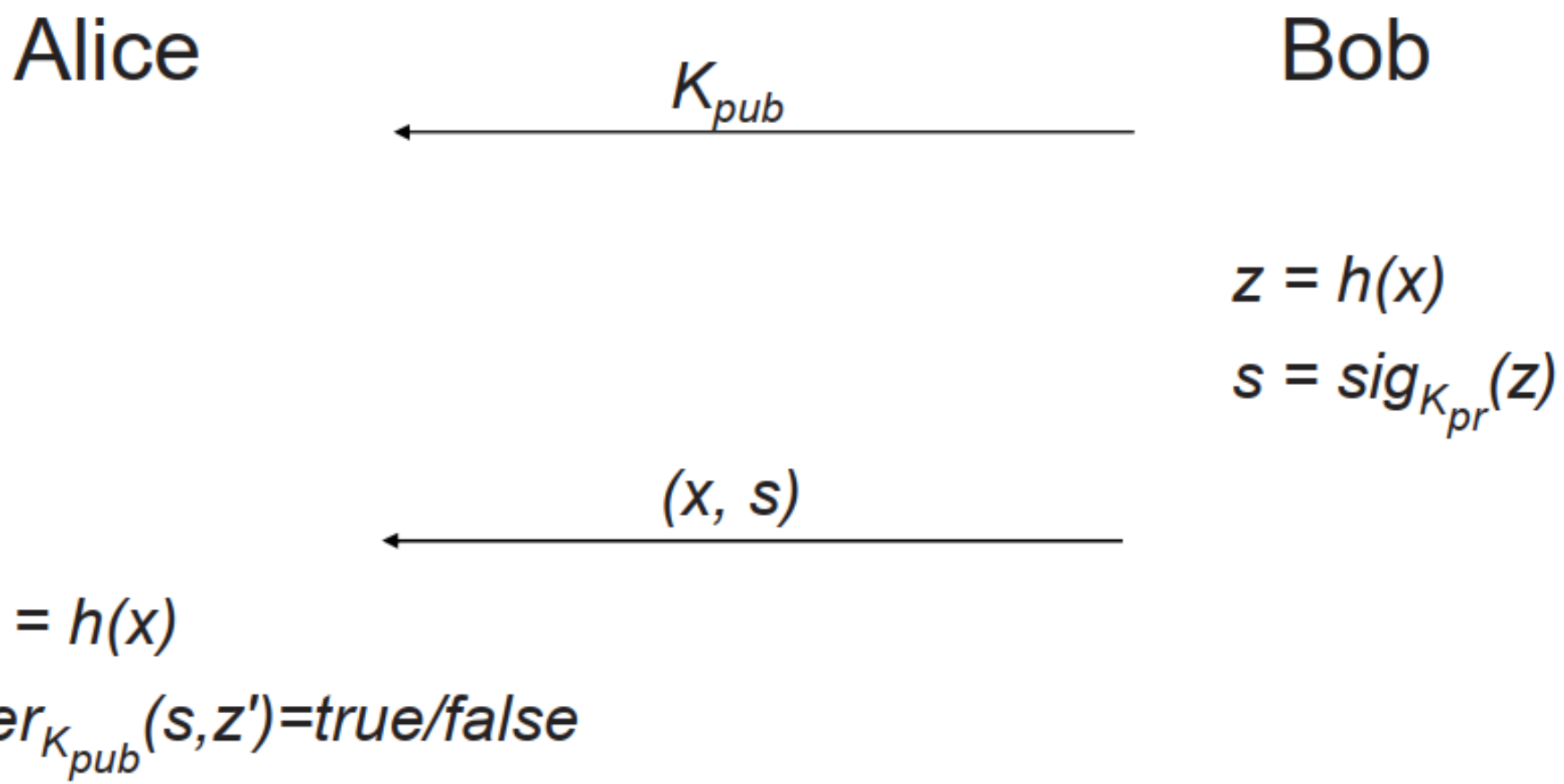
# Assinatura Digital com Função Hash




**Notes:**

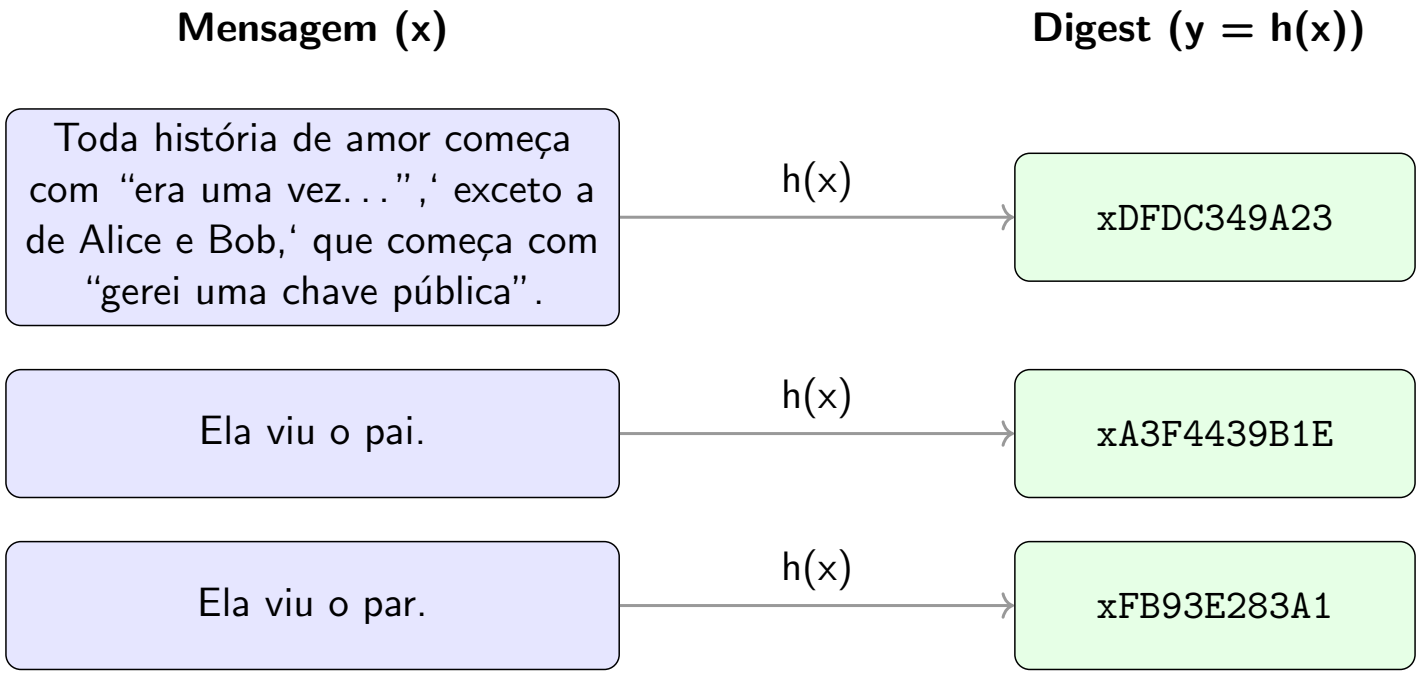
- *x* has fixed length
- *z, y* have fixed length
- *z, x* do not have equal length in general
- *h(x)* does not require a key.
- *h(x)* is public.

# Protocolo Básico de Assinatura Digital usando Função Hash



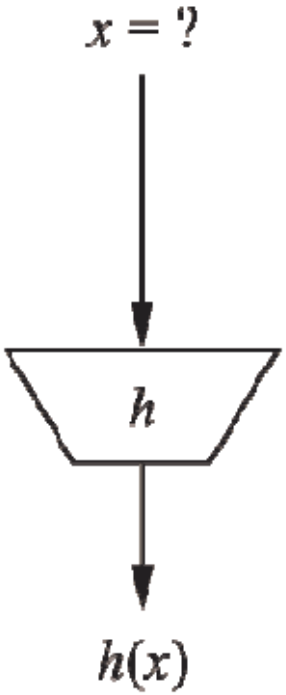
# Índice

# O que uma Função de Hash faz?

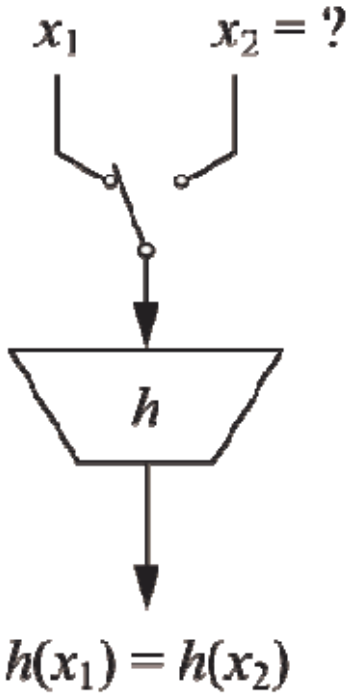



- **Entrada de tamanho arbitrário:** A função $h$ opera sobre uma mensagem $x$ de qualquer comprimento.
- **Saída de tamanho fixo:** O resultado (digest) $y = h(x)$ tem sempre o mesmo comprimento (ex: 256 bits).
- **Função de mão única (one-way):** Dado $x$, é fácil computar $h(x)$. Dado $h(x)$, é computacionalmente inviável encontrar $x$.

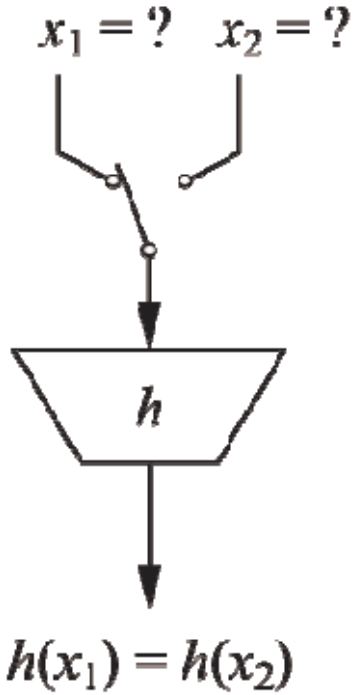
# As três propriedades das Funções Hash




preimage resistance




second preimage resistance




collision resistance

# As Três Garantias Fundamentais

- **Resistência à pré-imagem (Preimage resistance)**

  Para uma dada saída $z$, é computacionalmente inviável encontrar qualquer entrada $x$ tal que $h(x) = z$.

  - Essencialmente, a propriedade de ser uma função de mão única (*one-way*).

- **Resistência à segunda pré-imagem (Second preimage resistance)**

  Dado um bloco de dados $x_1$, é computacionalmente inviável encontrar *outro* bloco $x_2$ tal que $x_1 \neq x_2$ e que $h(x_1) = h(x_2)$.

  - Protege contra a falsificação de um documento já assinado.

- **Resistência à colisão (Collision resistance)**

  É computacionalmente inviável encontrar *qualquer par* de entradas distintas $x_1, x_2$ tal que $x_1 \neq x_2$ e que $h(x_1) = h(x_2)$.

  - É uma propriedade mais forte que a resistência à segunda pré-imagem.

# O Paradoxo do Aniversário

- A **resistência à colisão** é a propriedade que, na prática, causa mais problemas de segurança.

# O Paradoxo do Aniversário

- A **resistência à colisão** é a propriedade que, na prática, causa mais problemas de segurança.

- **Pergunta análoga:** Quantas pessoas são necessárias em uma sala para que a probabilidade de duas delas fazerem aniversário no mesmo dia seja de 50%?

# O Paradoxo do Aniversário

- A **resistência à colisão** é a propriedade que, na prática, causa mais problemas de segurança.

- **Pergunta análoga:** Quantas pessoas são necessárias em uma sala para que a probabilidade de duas delas fazerem aniversário no mesmo dia seja de 50%?
  - A resposta intuitiva seria $365/2 \approx 183$?

# O Paradoxo do Aniversário

- A **resistência à colisão** é a propriedade que, na prática, causa mais problemas de segurança.

- **Pergunta análoga:** Quantas pessoas são necessárias em uma sala para que a probabilidade de duas delas fazerem aniversário no mesmo dia seja de 50%?
  - A resposta intuitiva seria $365/2 \approx 183$? Não!

- Apenas 23 pessoas são suficientes! Isso é conhecido como o **Paradoxo do Aniversário**.

# O Paradoxo do Aniversário

- A **resistência à colisão** é a propriedade que, na prática, causa mais problemas de segurança.

- **Pergunta análoga:** Quantas pessoas são necessárias em uma sala para que a probabilidade de duas delas fazerem aniversário no mesmo dia seja de 50%?
  - A resposta intuitiva seria $365/2 \approx 183$? Não!

- Apenas 23 pessoas são suficientes! Isso é conhecido como o **Paradoxo do Aniversário**.

- **Implicação para Hashes:** Um ataque para encontrar colisões (chamado de *birthday attack*) é muito mais eficiente do que um ataque de força bruta. A busca leva aproximadamente $2^{n/2}$ passos para uma função de hash com saída de $n$ bits.

# O Paradoxo do Aniversário

- A **resistência à colisão** é a propriedade que, na prática, causa mais problemas de segurança.

- **Pergunta análoga:** Quantas pessoas são necessárias em uma sala para que a probabilidade de duas delas fazerem aniversário no mesmo dia seja de 50%?
  - A resposta intuitiva seria $365/2 \approx 183$? Não!

- Apenas 23 pessoas são suficientes! Isso é conhecido como o **Paradoxo do Aniversário**.

- **Implicação para Hashes:** Um ataque para encontrar colisões (chamado de *birthday attack*) é muito mais eficiente do que um ataque de força bruta. A busca leva aproximadamente $2^{n/2}$ passos para uma função de hash com saída de $n$ bits.

# O Paradoxo do Aniversário

## Por que o paradoxo funciona?

- A intuição falha porque não consideramos o número de **pares** possíveis. Com apenas 23 pessoas, existem 253 pares distintos, aumentando drasticamente a chance de uma coincidência.
- Em um ataque, o atacante não precisa quebrar o hash de um documento específico. Ele pode gerar várias versões de um documento bom e de um malicioso até que *qualquer par* entre eles produza o mesmo hash, o que é um problema muito mais fácil de resolver.

# O Paradoxo do Aniversário

**Por que o paradoxo funciona?**

- A intuição falha porque não consideramos o número de **pares** possíveis. Com apenas 23 pessoas, existem 253 pares distintos, aumentando drasticamente a chance de uma coincidência.
- Em um ataque, o atacante não precisa quebrar o hash de um documento específico. Ele pode gerar várias versões de um documento bom e de um malicioso até que *qualquer par* entre eles produza o mesmo hash, o que é um problema muito mais fácil de resolver.

**Recomendação de Segurança:** Para se proteger deste ataque, a recomendação é que a saída de uma função de hash deve ter **no mínimo 224 bits**.

# O Ataque de Aniversário e a Segurança Moderna

- O **Paradoxo do Aniversário** mostra que é muito mais fácil encontrar *qualquer* colisão do que uma específica.
  - Para um hash de $n$ bits, a complexidade de um ataque de aniversário é de aproximadamente $2^{n/2}$ operações.
- **O Padrão Antigo (Obsoleto)**
  - A recomendação de 160 bits (do algoritmo SHA-1) oferecia $160/2 = 80$ bits de segurança contra colisão.
  - Este nível de segurança ($2^{80}$) não é mais considerado seguro contra adversários com recursos significativos.
- **A Recomendação Atual (NIST)**
  - O NIST exige um nível de segurança de no mínimo **112 bits** contra colisão.
  - Para isso, a saída do hash deve ter no mínimo $2 \times 112 =$ **224 bits**.
- **Conclusão Prática para Novos Sistemas:**

# O Ataque de Aniversário e a Segurança Moderna

- O **Paradoxo do Aniversário** mostra que é muito mais fácil encontrar *qualquer* colisão do que uma específica.
  - Para um hash de $n$ bits, a complexidade de um ataque de aniversário é de aproximadamente $2^{n/2}$ operações.

- **O Padrão Antigo (Obsoleto)**
  - A recomendação de 160 bits (do algoritmo SHA-1) oferecia $160/2 = 80$ bits de segurança contra colisão.
  - Este nível de segurança ($2^{80}$) não é mais considerado seguro contra adversários com recursos significativos.

- **A Recomendação Atual (NIST)**
  - O NIST exige um nível de segurança de no mínimo **112 bits** contra colisão.
  - Para isso, a saída do hash deve ter no mínimo $2 \times 112 = \mathbf{224\ bits}$.

- **Conclusão Prática para Novos Sistemas:**
  - Use no mínimo SHA-256 (saída de 256 bits).
  - Abandone completamente o uso de SHA-1.

# Funções de Hash: Lições Aprendidas (Versão Atualizada)

- **Natureza e Uso Principal**
  - Funções de Hash não usam chaves (*keyless*).
  - Suas aplicações mais importantes são em assinaturas digitais e em códigos de autenticação de mensagens (MACs), como o HMAC.
- **Requisitos de Segurança Fundamentais**
  - As três propriedades de segurança essenciais são a resistência à pré-imagem (one-wayness), à segunda pré-imagem e à colisão.
- **Estado Atual dos Algoritmos**
  - **MD5 e SHA-1:** São considerados inseguros. O SHA-1 possui falhas graves e seu uso deve ser completamente descontinuado.
  - **SHA-2:** A família de algoritmos SHA-2 (ex: SHA-256, SHA-512) continua sendo considerada segura e é o padrão de mercado atual.
  - **SHA-3 (Atualização):** A competição SHA-3 terminou em 2012. O algoritmo vencedor (Keccak) foi padronizado em 2015. Ele serve como uma alternativa moderna ao SHA-2.
- **Recomendação de Tamanho (Atualizada)**
  - Para segurança de longo prazo e para resistir a ataques de colisão (ataques de aniversário), a recomendação atual é usar saídas de no mínimo 256 bits.

# Índice

# SHA-3: Motivação e Contexto

- Em 2007, o NIST lança uma competição pública para definir uma nova função de hash: **SHA-3**.
- Motivação principal:
  - Ter uma alternativa a **SHA-2** com **projeto interno diferente**.
  - Garantir continuidade da segurança caso ocorra algum avanço criptanalítico contra o SHA-2.
- Diferentemente do AES (que substituiu o DES), **SHA-2 e SHA-3 foram projetados para coexistir**.
- O processo de seleção foi semelhante ao do AES:
  - Competição aberta.
  - Forte participação e escrutínio da comunidade científica.
- SHA-3 foi padronizado em 2015 como **FIPS 202**.

# Linha do Tempo da Competição SHA-3

- **Nov 2007**: NIST anuncia a chamada de algoritmos para SHA-3.
- **Dez 2008**: 51 algoritmos selecionados para a **Rodada 1**.
- **Jul 2009**: Redução para **14 algoritmos** na **Rodada 2**.
- **Dez 2010**: NIST anuncia os **5 finalistas** (Rodada 3):
  - BLAKE, Grøstl, JH, Keccak e Skein.
- **Out 2012**: **Keccak** é selecionado como base do SHA-3.
- **Ago 2015**: Publicação oficial do **FIPS 202** (padronização do SHA-3).

- "Padronizado" aqui significa tornar-se um **FIPS** (*Federal Information Processing Standard*) nos EUA.
- Embora o uso obrigatório seja para sistemas governamentais dos EUA, a participação internacional no processo faz com que SHA-3 seja amplamente adotado globalmente, assim como o AES.

# Parâmetros de Segurança e SHAKE (XOFs)

- **Comprimentos de saída** suportados por SHA-3:

$$n \in \{224, 256, 384, 512\} \text{ bits}$$

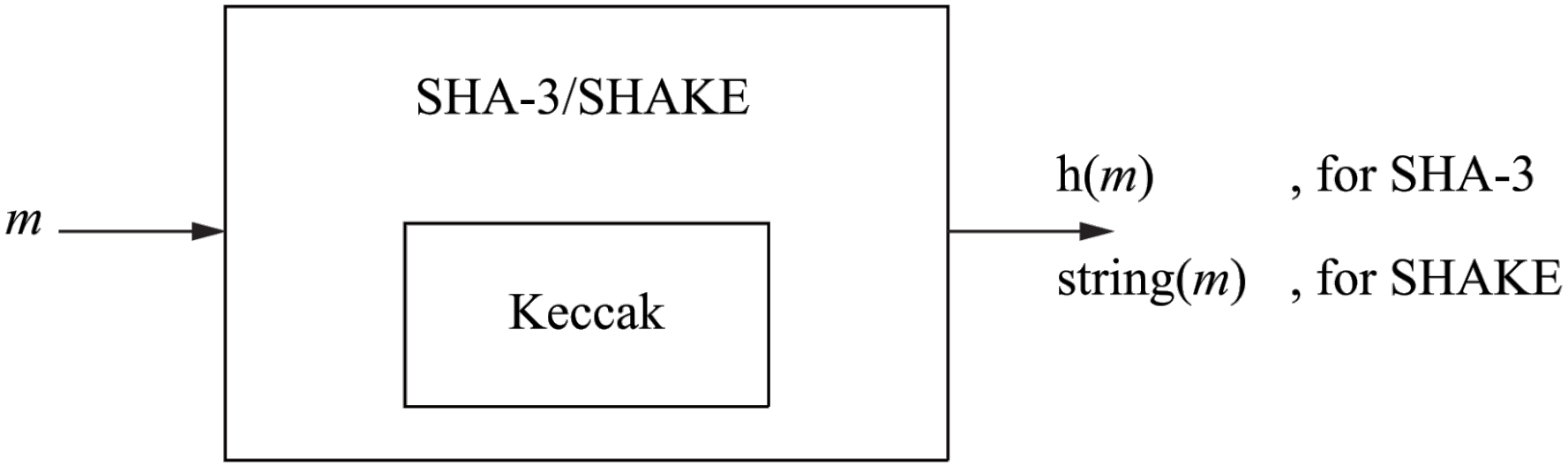
- Pela **paradoxo do aniversário**, a complexidade de ataque por colisão é aproximadamente:

$$2^{112}, 2^{128}, 2^{192}, 2^{256}$$

  para saídas de 224, 256, 384 e 512 bits, respectivamente.
- Esses níveis de segurança se alinham com:
  - **AES-128/192/256** (força contra força bruta),
  - **3DES** (força $\approx 2^{112}$).
- SHA-2 também suporta saídas de 224, 256, 384 e 512 bits:
  - Facilita o uso de **SHA-2 ou SHA-3 como alternativas compatíveis**.
- SHA-3 também suporta *extendable-output function* (XOF):
  - **SHAKE128** e **SHAKE256**: produzem saídas de comprimento arbitrário.
  - Oferecem níveis de segurança de aproximadamente 128 e 256 bits.
  - SHA-1 e SHA-2 **não** possuem suporte a XOF.

# Visão de Alto Nível de SHA-3 e SHAKE

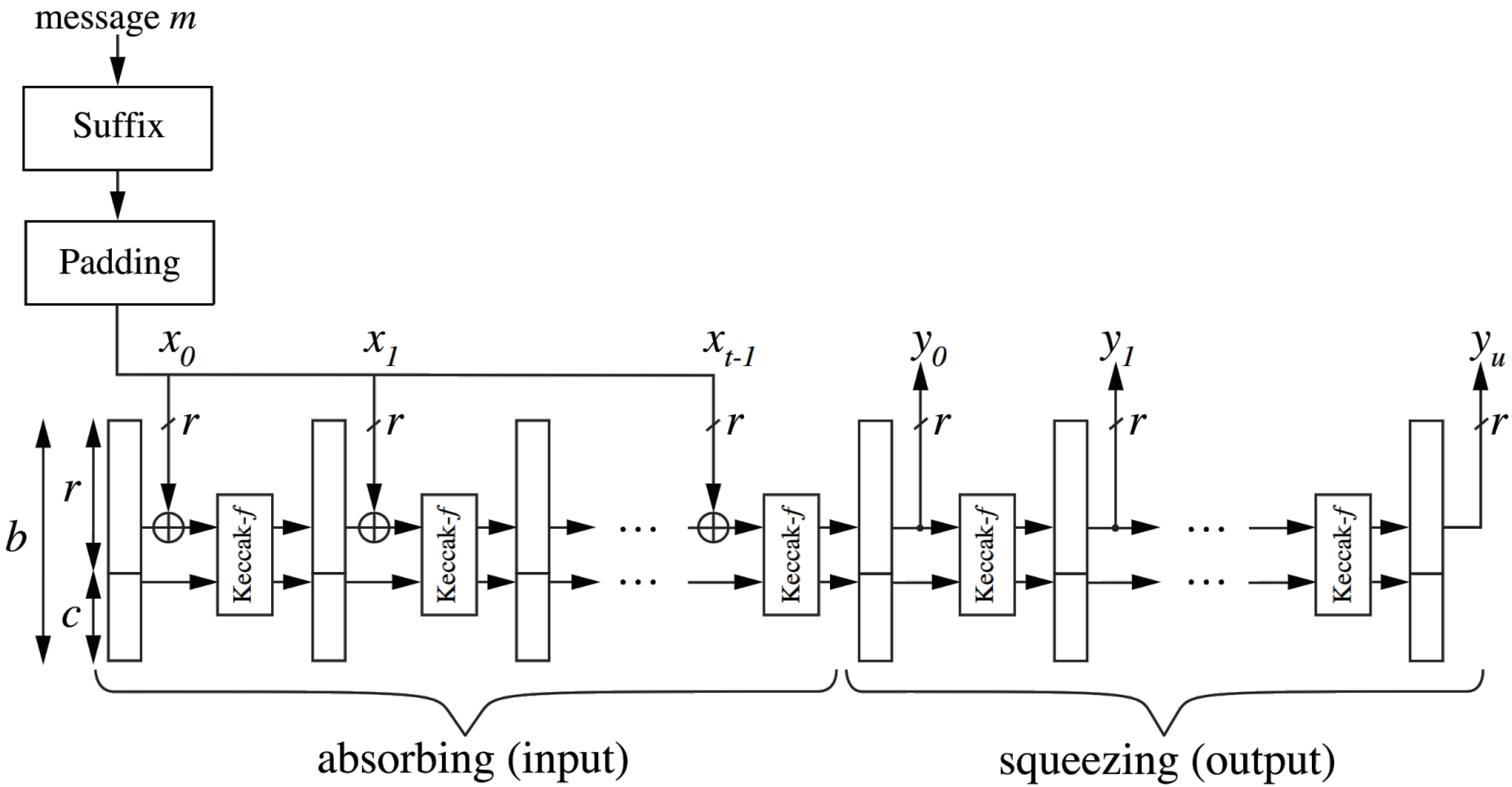
- **SHA-3** e suas variantes **SHAKE128/256** são baseadas no algoritmo **Keccak**.
- Keccak é o **núcleo criptográfico**: uma permutação utilizada no modo esponja.
- A construção **SHA-3/SHAKE** recebe uma mensagem $m$ e:
  - gera um **digest de tamanho fixo** $h(m)$ (caso SHA-3);
  - ou uma **saída de tamanho arbitrário** $\texttt{string}(m)$ (caso SHAKE).
- Mesma base Keccak, **diferentes parâmetros de uso** (comprimento de saída, segurança efetiva).



# Keccak: Construção Esponja (Visão Geral)

- **SHA-3** e as variantes **SHAKE128/256** são baseadas no algoritmo **Keccak**.
- SHA-3:
  - Recebe uma mensagem $m$.
  - Produz um **digest de tamanho fixo** $h(m)$.
- SHAKE128/256 (*Secure Hash Algorithm Keccak*):
  - São **funções de saída extensível (XOF)**.
  - Geram uma **string de bits de tamanho arbitrário** string($m$).
- Keccak é baseado em uma **construção esponja**:
  - Antes de tudo, há um **preprocessamento** de $m$ (sufixo + padding, divisão em blocos).
  - Depois disso, a esponja possui duas fases:
    1. **Fase de absorção**: processa os blocos de entrada $x_i$.
    2. **Fase de espremer (squeezing)**: gera blocos de saída $y_j$.
- Keccak, por si só, permite gerar **quantos blocos de saída $y_j$ forem necessários**:
  - Para **SHA-3**: apenas $y_0$ é usado, e seus primeiros bits formam $h(m)$.
  - Para **SHAKE128/256**: usa-se a sequência $y_0, y_1, \ldots$ conforme a aplicação.

# Keccak: Construção Esponja



# Parâmetros da Esponja Keccak: $b$, $r$, $c$

- O "coração" é a função de permutação **Keccak-f**.
- Keccak-f opera sobre um **estado interno** de largura $b$ bits:

$$b = r + c$$

onde:

  - $b$ é a **largura do estado** (fixada em $b = 1600$ bits).
  - $r$ é a **taxa de bits (bit rate)**:
    - comprimento de cada bloco de mensagem $x_i$;
  - $c$ é a **capacidade**:
    - controla o **nível de segurança** da construção.
- Diferentes combinações de $(r, c)$, com $b = 1600$ fixo, resultam em:
  - diferentes **desempenhos** (mais/menos bits absorvidos/expelidos por chamada de Keccak-f);

| | function type | $b$ (state) [bits] | $r$ (rate) [bits] | $c$ (capacity) [bits] | security level [bits] | hash output [bits] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **SHA3-224** | hash | 1600 | 1152 | 448 | 112 | 224 |
| **SHA3-256** | hash | 1600 | 1088 | 512 | 128 | 256 |
| **SHA3-384** | hash | 1600 | 832 | 768 | 192 | 384 |
| **SHA3-512** | hash | 1600 | 576 | 1024 | 256 | 512 |
| **SHAKE128** | XOF | 1600 | 1344 | 256 | 128 | arbitrary |
| **SHAKE256** | XOF | 1600 | 1088 | 512 | 256 | arbitrary |

# SHA-3 / SHAKE: Sufixo e Padding

- Antes do processamento de uma mensagem $m$, são aplicados:
  - um **sufixo** específico de SHA-3 ou SHAKE;
  - um **padding** definido na especificação de Keccak.
- O sufixo **não** faz parte da função Keccak em si, mas é exigido por SHA-3 e SHAKE128/256:
  - SHA-3: $\text{suf} = 01$;
  - SHAKE128/256: $\text{suf} = 1111$.
- Esses sufixos diferentes garantem **separação de domínio**:
  - a mesma mensagem $m$ não produz a mesma sequência de bits quando usada em SHA-3 e em SHAKE;
  - evita reutilização insegura do mesmo estado interno para funções com propósitos diferentes (hash fixo vs XOF/pseudorrandômico).
- Após anexar o sufixo, aplica-se o **multi-rate padding**:

$$\text{pad}(m, \text{suf}) = m \,\|\, \text{suf} \,\|\, 10^*1$$

onde:

- $10^*1$ é uma sequência que começa com 1, segue com o menor número possível de zeros e termina com 1;
- o objetivo é que o comprimento total seja um múltiplo de $r$ bits.

# SHA-3 / SHAKE: Comprimento da Saída e Uso de $y_j$

- Após absorver todos os blocos de entrada $x_i$, Keccak entra na fase de **squeezing**, gerando blocos de saída $y_0, y_1, \ldots$, cada um com $r$ bits.
- **SHA-3**:
  - Apenas o **primeiro bloco** $y_0$ é considerado.
  - $y_0$ tem $r$ bits, mas o digest requerido é de 224, 256, 384 ou 512 bits.
  - Usa-se apenas os **bits mais significativos** de $y_0$; os demais bits de $y_0$ são descartados.
- **SHAKE128/256**:
  - Todos os $r$ bits de $y_0$ podem ser usados.
  - Se a aplicação necessita de mais que $r$ bits:
    - aplica-se a permutação **Keccak-f** novamente ao estado;
    - gera-se $y_1, y_2, \ldots$ até alcançar o comprimento desejado.
  - Isso transforma SHAKE em uma **XOF**: função de saída extensível, útil como hash configurável, KDF ou PRNG.
- O tamanho de padding:
  - mínimo: sequência 11 (2 bits);
  - máximo: padrão 10...01 com comprimento $r + 1$ bits.

# Função Keccak-f: Permutação Base de SHA-3

- **Keccak-f** é o núcleo de **Keccak**, logo de **SHA-3** e **SHAKE128/256**.
- É uma **permutação** sobre $2^b$ estados:
  - Cada inteiro de $b$ bits é mapeado *bijetivamente* em outro inteiro de $b$ bits.
- O estado é visto como um arranjo 3D de bits:

$$b = 5 \times 5 \times w$$

  - Coordenadas $(x, y)$ formam uma **coluna**, e os $w$ bits ao longo de $z$ são chamados de **lane**.
  - Para SHA-3/SHAKE: $w = 64$ bits é mapeado para: $b = 1600$ bits.
- O estado de 1600 bits encaixa bem em arquiteturas de 64 bits:
  - Pode ser armazenado como um vetor de 25 palavras de 64 bits.

# Keccak-f: Tamanhos de Estado e Estrutura de Rodadas

- Keccak-f suporta sete tamanhos de estado:

$$b = 25 \cdot 2^l, \quad l = 0, 1, \ldots, 6$$

$$w = 2^l, \quad b = 5 \times 5 \times w$$

- Número de rodadas para cada $b$:

$$n_r = 12 + 2^l$$

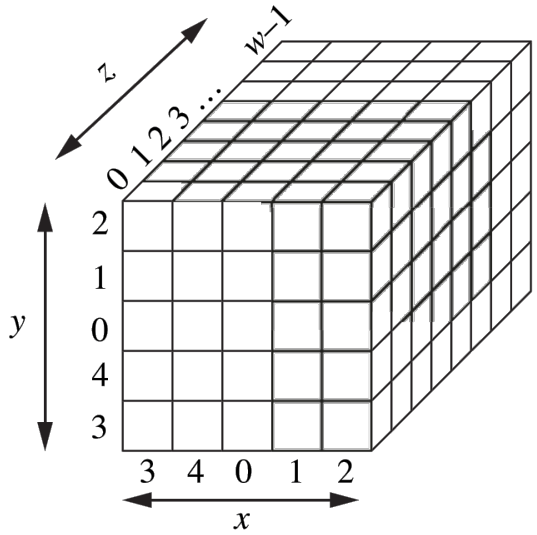
  - Para SHA-3/SHAKE128/256: $b = 1600$, $w = 64$, $l = 6$, logo $n_r = 24$.
- Cada rodada de Keccak-f aplica, em sequência, cinco transformações lineares/não lineares:

$$\theta,\ \rho,\ \pi,\ \chi,\ \iota$$

  - Todas as rodadas têm a mesma estrutura.
  - Diferem apenas pela **constante de rodada** $RC[i]$, usada na etapa $\iota$.
- Essência: uma permutação altamente misturadora de 1600 bits, aplicada várias vezes, que confere à esponja Keccak suas propriedades de segurança.

# Visualização do estado interno

Visualização 3D do estado do Keccak, cada pequeno cubo representa um bit. Para o SHA-3 e o SHAKE128/256, a "profundidade" do arranjo ao longo do eixo $z$ é $w = 64$.

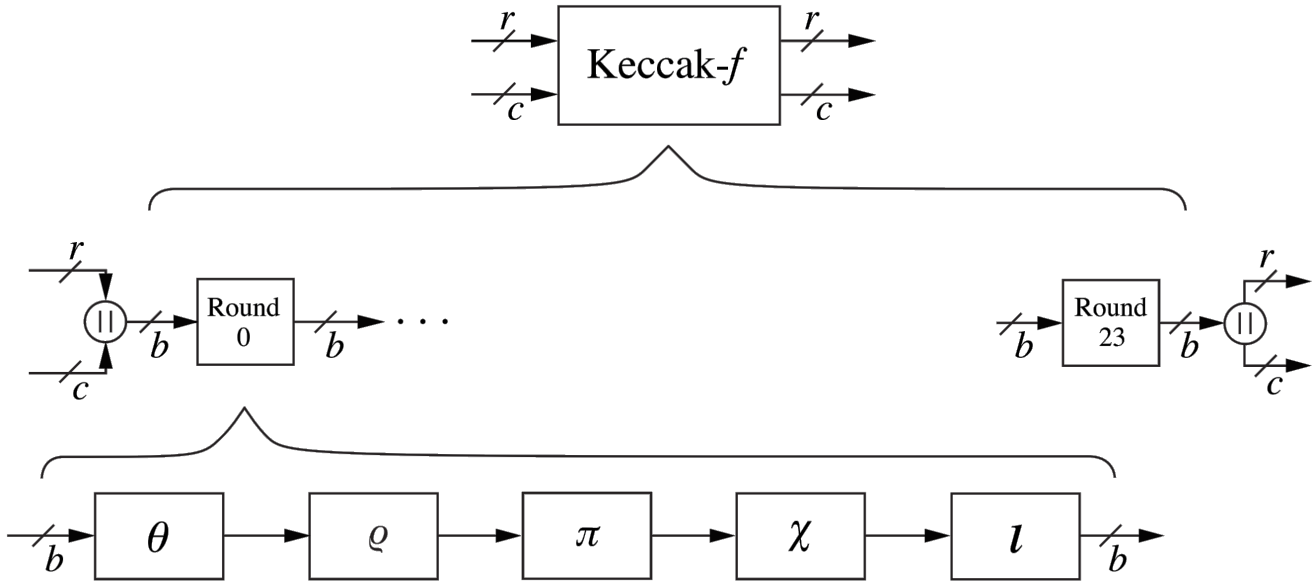



Os diferentes tamanhos de estado e o número de rodadas de Keccak-f; note que $b = 1600$ e $n_r = 24$ para o SHA-3 e o SHAKE128/256.

| state $b$ [bits] | 25 | 50 | 100 | 200 | 400 | 800 | **1600** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| number of rounds $n_r$ | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | **24** |
| lane $w$ [bits] | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | **64** |
| $l$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

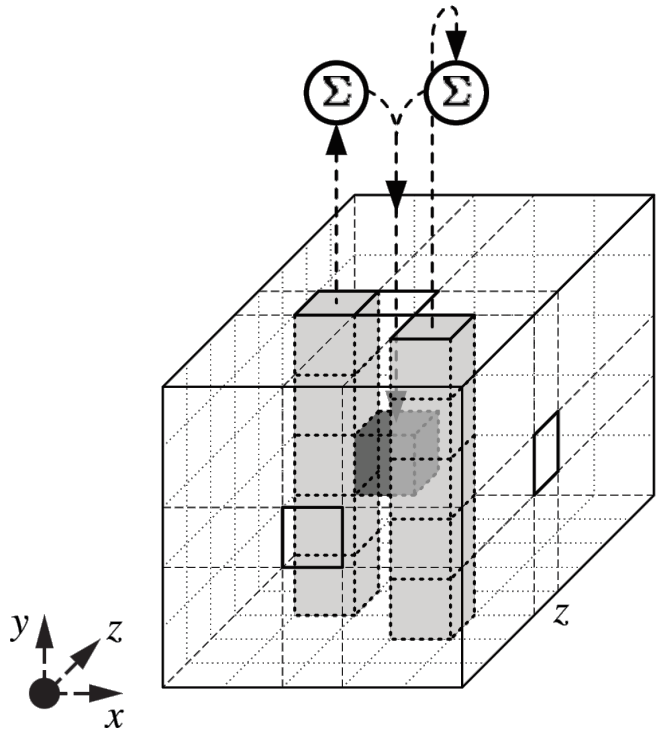
# Estrutura Interna da Função Keccak-$f$

- Cada chamada de Keccak-f aplica $n_r = 24$ rodadas idênticas, e cada rodada é composta em série pelas etapas $\theta$, $\rho$, $\pi$, $\chi$ e $\iota$; apenas a etapa $\iota$ recebe uma constante de rodada $RC[i]$ diferente em cada iteração.



# Etapa $\theta$ do Keccak-f

- Transformação linear de difusão do Keccak-f: cada bit do estado é substituído pelo XOR entre si e com outros 10 bits de sua vizinhança, espalhando a influência de cada coluna por todo o estado.
- Na implementação, calculam-se:
  - $C[x] = A[x,0] \oplus A[x,1] \oplus A[x,3] \oplus A[x,4]$
  - $D[x] = C[x-1] \oplus \text{rot}(C[x+1],1)$
  - $A'[x,y] = A[x,y] \oplus D[x]$



# Etapa $\rho$ do Keccak-f

- O estado é visto como um arranjo $5 \times 5$ de *lanes* $A(x, y)$, cada um com $w$ bits (para o SHA3 e SHAKE128/256 $w = 64$).
- Cada lane é submetida a uma **rotação circular de bits** com um deslocamento (offset) específico, que depende exclusivamente das coordenadas $(x, y)$ dessa lane.
- Todos os deslocamentos são tomados módulo $w$, e foram escolhidos de forma a espalhar os bits ao longo da dimensão $z$, contribuindo para uma boa difusão em combinação com as demais etapas da permutação.
- A tabela abaixo mostra, para cada posição $(x, y)$, o número de bits de rotação aplicado na etapa $\rho$.

| | $x=3$ | $x=4$ | $x=0$ | $x=1$ | $x=2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $y=2$ | 153 | 231 | 3 | 10 | 171 |
| $y=1$ | 55 | 276 | 36 | 300 | 6 |
| $y=0$ | 28 | 91 | 0 | 1 | 190 |
| $y=4$ | 120 | 78 | 210 | 66 | 253 |
| $y=3$ | 21 | 136 | 105 | 45 | 15 |

# Etapa $\pi$ do Keccak-f

- A etapa $\pi$ é uma **permutação das 25 lanes** do estado $A(x, y)$ visto como uma matriz $5 \times 5$.
- Dado o novo arranjo $A'$, a regra de permutação é:

$$A'[x, y] = A[x + 3y,\ x], \quad x, y = 0, 1, 2, 3, 4$$

  onde todas as coordenadas são computadas módulo 5.
- Nenhum bit é modificado, apenas **reordenado**:
  - a etapa $\pi$ redistribui as lanes no plano $(x, y)$;
  - prepara o estado para que as operações seguintes (especialmente a $\chi$) combinem bits de posições que antes não interagiam.
- Exemplo: a posição $A'[2, 3]$ será preenchida pela lane

$$A[2 + 3 \cdot 3,\ 2] = A[11, 2] = A[1, 2] \quad (\text{mód } 5),$$

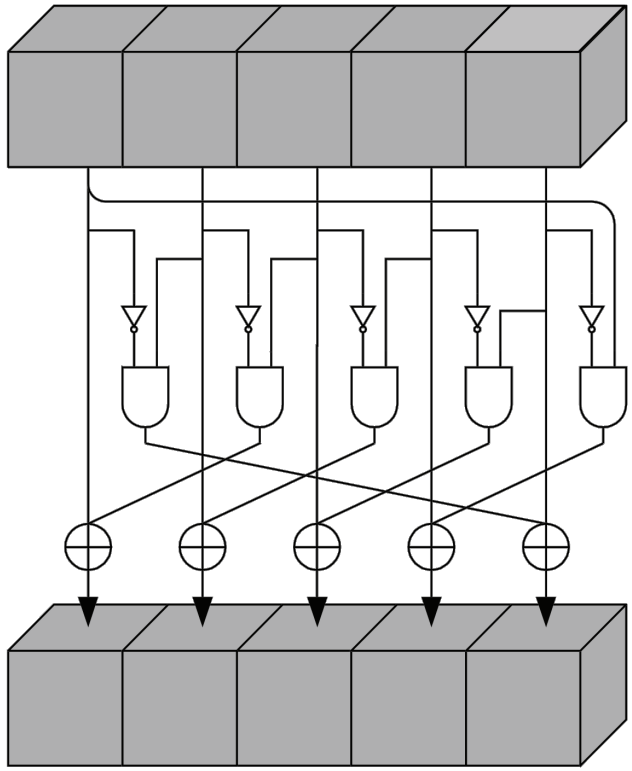
  isto é, a lane originalmente em $(1, 2)$ é movida para a borda inferior direita.

# Etapa $\chi$ do Keccak-f

- **Única operação não linear** dentro do Keccak-f.
- Opera por linhas de lanes: para cada coordenada $(x, y)$ temos

$$A'[x, y] = A[x, y] \oplus \left(\overline{A[x+1, y]} \wedge A[x+2, y]\right), \quad x, y = 0, 1, 2, 3, 4$$

onde os índices são tomados módulo 5.



# Etapa $\iota$ do Keccak-f

- A etapa $\iota$ adiciona uma **constante de rodada** de $w$ bits à lane na posição $(0, 0)$ do estado:

$$A'[0, 0] = A[0, 0] \oplus RC[i].$$

- A constante $RC[i]$ depende da rodada $i$:
  - o número de rodadas $n_r$ varia com o parâmetro $b$;
  - para SHA-3 e SHAKE128/256 temos $n_r = 24$ rodadas, logo $RC[0], \ldots, RC[23]$.
- Cada $RC[i]$ é, em essência, um vetor quase todo nulo, com bits pseudoaleatórios em posições específicas (por exemplo 1, 2, 3, 7, 15, 31, 63), gerados por um LFSR de grau 8.
- A função da etapa $\iota$ é **quebrar simetrias** entre rodadas: ela insere dependência explícita do índice de rodada na permutação Keccak-f, reforçando a segurança contra ataques estruturais.

# Lições Aprendidas sobre Funções Hash

- Funções hash são **sem chave** (keyless) e têm muitas aplicações em sistemas de segurança modernos, como **assinaturas digitais** e **MACs**.
- As três propriedades de segurança fundamentais são:
  - **one-wayness** (pré-imagem difícil),
  - **segunda pré-imagem** difícil,
  - **resistência a colisões**.
- Para resistir a ataques de colisão, a saída de uma função hash deve ter, em geral, **256 bits ou mais**.
- **SHA-2** e **SHA-3** são considerados altamente seguros atualmente; não há ataques práticos conhecidos. Já o **SHA-1** é considerado inseguro.
- Além de algoritmos dedicados (como SHA-2 e SHA-3), é possível construir funções hash a partir de **cifras de bloco**.
- **SHA-3** baseia-se em uma **construção esponja**, o que o torna, internamente, bem diferente de SHA-1 e SHA-2.
- Em **hardware**, SHA-3 tende a ser mais eficiente, sendo adequado para aplicações móveis e embarcadas; em **software**, SHA-2 costuma ser mais rápido do que SHA-3.